Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article

Vol. 12, No. 2, Summer 2022, p. 169-179

Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM)

E. Chavoshgholi[1*], Sh. Abdollahpour[2], H. Ghasemzadeh[3]

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
3- Professor in Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: Es.chavoshgoli@gmail.com)

Received: 21-09-2019 Revised: 26-10-2019 Accepted: 17-12-2019	**How to cite this article:** Chavoshgholi, E., Sh. Abdollahpour, and H. Ghasemzadeh. 2022. Development and Optimization a Threshing Unit for Sunflower Grain with Response Surface Methodology (RSM). Journal of Agricultural Machinery 12 (2): 169-179. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.v12i2.83123.

Introduction

The nut sunflower is usually cultivated in small farms and is harvested with a low capacity of harvester at high moisture content. For the rigid threshing components, impact and knead force are so large as it leads to crushing of the grain or inner stress. This reduces marketability and the germination rate of seeds. The mechanical damage degree of sunflower grain is influenced by the material of the threshing beaters, the velocity of impact, moisture contents, etc. Traditional manual methods, that separate grain from the sunflower head, take a lot of time, require large manpower, have high grain damage, and low efficiency. The objective of the present work was to develop and optimize a threshing unit for nutty sunflower that would combine safe impact velocities with appropriate adjusting of its variable to maximize threshing efficiency whilst minimizing grain damage resulting from shearing, cracking, or crushing.

Materials and Methods

The nutty Sunflower heads were procured from the Experimental Orchard of University of Tabriz, Iran at the moisture content of harvesting. Axial threshing units using kinematic equation and properties of the grain, designed and constructed that the variables of its components are adjustable. The beater of the thresher is flexible, which the deformation and vibration undergoing the overall rotation and impact process becomes larger with increasing speed and prevents grain damage. The power required for threshing and separation grain from heads was calculated at about 4.5 kW. Diameter and rotational drum speed value estimated using relation ($V=\frac{D}{2}n$) and study of other researches as considering critical impact velocity of sunflower grain. The length of the thresher was 1.2 m that estimated by determining the capacity and the number of beaters. Threshing efficiency (%), separation efficiency (%), and grain damage (%) were parameters of performance for study. The experimental design by the Response Surface Methodology in Design Expert software 11 with central composite experiment design developed and the affecting parameters on accuracy analyzed and optimized. The threshing unit was evaluated against three threshing drum speeds of 380, 280, and 180 (rpm), feed rates 4000, 3000, and 2000 (kg (head) h^{-1}), moisture content of 60%, 45%, and 30 (%w.b).

Results and Discussion

The results showed that the models and effect of variables were statistically significant at the 95% confidence level. The moisture content on threshing efficiency and grain damage had the greatest effect followed by drum speed and feed rate. While for separation efficiency, the feed rate had the most influence. With reducing feed rate and moisture content the threshing efficiency increased, although the decrease in drum speed reduced it. This might be due to sunflower grains adhering loosely to the head at the low moisture contents. The maximum (99.81) and minimum (96.12) percentage of threshed heads was at the moisture content of 30 and 60, respectively. The separation efficiency increased with reducing of feed rate and moisture content. Though, drum speed had insignificant efficacy statistically. The sunflower heads with high moisture content are fragile and brittle, also at high feed rates, the number of impact forces and collisions of heads rises in the condition of threshing. Therefore, the extra MOG is produced and passed from the separator grille. The feed rate of 2000 kg h^{-1} and moisture content of 30% was the maximum point of separation efficiency that obtained 69.82%. The grain damage decreased significantly with reducing drum speed (380 to 180) and moisture content (60 to 30). This result may be due to the reasons that at higher moisture content the husk of grains becomes soft. The goal of optimization is maximizing threshing and separation efficiency and minimizing grain damage that the optimized values of variables were determined 292.134 rpm for drum speed, 2000 kg h^{-1} for feed rate, and 30.7406% (w.b) for moisture content.

Conclusion

A threshing unit of sunflower, using properties of grains and kinematic equation, was designed and constructed. The models and effect of the variable were statistically significant on performances. The moisture content had a greater effect than other factors on threshing efficiency (%) and grain damage (%). Also, the feed rate of crops in thresher had the most influence on separation efficiency (%). With decreasing the moisture content, threshing and separation efficiency increased and grain damage reduced. The threshing efficiency (%), separation efficiency (%), and grain damage (%) were reported in the range of 96.12 to 99.81, 57.34 to 68.55, and 0.49 to 1.25, respectively. The optimized points were determined at the drum speed of 292.134 m s^{-1}, feed rate of 2000 kg h^{-1}, and moisture content of 30.7406% (w.b).

Keywords: Critical velocity, Nutty sunflower, Optimization, Performance, RSM, Threshing

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۱۷۹-۱۶۹

بهینه‌سازی واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

اسماعیل چاوشقلی[1*]، شمس‌اله عبداله پور[2]، حمیدرضا قاسم زاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

چکیده

آفتاب‌گردان آجیلی معمولاً بدون کمباین برداشت در رطوبت بالا برداشت می‌شود لذا در تحقیق حاضر یک واحد کوبنده با ترکیب متغیرهای مناسب برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان و طبق‌ها با ظرفیت بالا و آسیب‌دیدگی پایین دانه، طراحی و ساخته شد. کوبنده برای شرایط گوناگون قابلیت تنظیم و بهینه‌سازی دارد که برای توسعه ماشین برداشت با ظرفیت بالا اهمیت فراوانی دارد. آزمایش‌های ارزیابی و بهینه‌یابی با استفاده از روش سطح پاسخ طراحی شد. تأثیرات سرعت‌دورانی کوبنده ۳۸۰، ۲۸۰ و ۱۸۰ (دور در دقیقه)، نرخ تغذیه ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ (کیلوگرم در ساعت) و رطوبت (رطوبت برداشت) ۶۰٪، ۴۵٪ و ۳۰٪ (بر پایه تر) روی عملکرد کوبنده مورد بررسی قرار گرفت. بازده کوبش (٪)، بازده جداسازی (٪) و آسیب‌دیدگی دانه (٪) به‌ترتیب در محدوده ۹۶/۱۲ تا ۹۹/۸۹، ۵۶/۷۱ تا ۶۹/۸۲ و ۰/۴۹ تا ۱/۲۵ به‌دست آمد. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس نشان داد که مدل‌های ایجاد شده از لحاظ آماری و اثر محتوی رطوبت روی بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و اثر نرخ تغذیه روی بازده جداسازی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بودند. منحنی‌های سطح پاسخ مشخص کردند که با کاهش محتوی رطوبت، بازده کوبش و جداسازی افزایش و آسیب‌دیدگی دانه‌ها کاهش پیدا کرد. هدف از بهینه‌یابی رسیدن به حداکثر بازده کوبش و جداسازی و حداقل کردن آسیب‌دیدگی دانه‌ها است که مقادیر بهینه شده متغیرها در نرم‌افزار Design Expert برای سرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و محتوی رطوبت ۳۰/۷۴٪ (بر پایه تر) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آفتاب‌گردان آجیلی، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ، سرعت ضربه‌ای بحرانی، عملکرد، واحد کوبنده

مقدمه

آفتاب‌گردان (*Helianthus annuus* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات روغنی جهان است. هم‌چنین به دلیل مصرف تازه و آجیلی در بعضی از کشورها مانند ایران، ترکیه و بسیاری از کشورهای عربی بسیار محبوب است (Chavoshgoli *et al*., 2015). آفتاب‌گردان آجیلی معمولاً در مزارع با وسعت کوچک کشت و در رطوبت بالای محصول بدون ماشین برداشت‌کننده با ظرفیت بالا عمل جداسازی دانه‌ها از طبق‌ها و مواد غیردانه انجام می‌شود (Azharuddin *et al*., 2016). کوبش محصولات دانه‌ای یکی از اصلی‌ترین موضوع‌ها است که در تعیین عملکرد کمباین‌های برداشت‌کننده نقش اساسی ایفا می‌کند (Sudajan *et al*., 2002). در بسیاری از کوبنده‌های ثابت و روش‌های جداسازی موجود نیروهای ضربه‌ای بالا بوده که منجر به آسیب‌دیدگی و تنش‌های داخلی دانه‌ها شده که این موضوع باعث کاهش ارزش درجه‌بندی دانه و در نتیجه کاهش بازارپسندی و جوانه‌زنی دانه‌ها می‌شود؛ درجه آسیب‌دیدگی مکانیکی دانه آفتاب‌گردان تحت تاثیر اجزای کوبنده، سرعت ضربه‌ای، نوع و شکل نیروی ضربه‌ای وارده، شرایط محصول هم‌چون رطوبت و غیره بوده است. شکست دانه در کوبنده‌ها بیش‌تر بستگی به سرعت‌های ضربه‌ای وارده به دانه و میزان سفتی ضربه‌زن‌ها دارد (Xu *et al*., 2013; Zhenjie, 2017). در روش‌های سنتی و دستی یا ماشین‌های کم ظرفیت که برای جداسازی دانه‌های آجیلی آفتاب‌گردان از طبق آن استفاده می‌شود که زمان و نیروی انسانی بیش‌تری را می‌طلبد و یا

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گرایش طراحی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
۳- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Es.chavoshgoli@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v12i2.83123

آسیب دانه‌ای زیادی دارد (Mirzabe *et al.*, 2016). محققان بسیاری تئوری عملکردی کوبنده‌های غلات را بررسی کرده‌اند و نشان دادند که بازده کوبش و جداسازی و آسیب‌دیدگی دانه به متغیرهای ماشین و خواص محصول بستگی دارد. برای مثال مونا و همکاران (Muna *et al.*, 2016) مدلی برای بازده کوبنده براساس پارامترهای ماشین از قبیل سرعت خطی استوانه کوبنده، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، طول کوبنده، تعداد ضربه‌زن‌ها و پارامترهای محصول از قبیل محتوی رطوبت بیان کردند. سادجان و همکاران (Sudajan *et al.*, 2002) توان مورد نیاز و فاکتورهای عملکردی یک کوبنده آفتاب‌گردان را مورد بررسی قرار دادند. لطفی (Lotfi, 2009) یک وسیله جداساز محلی را برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان با استفاده از نیروی رانش و خارج از مرکز توسعه داد. داسیا و همکاران (Thasaiya *et al.*, 2014) بیان کردند که نیروی لازم برای گسیختگی دانه‌ها، به خواص محصول بستگی دارد که برای طراحی تجهیزات کوبنده مورد نیاز است. میرزاب و همکاران (Mirzabe *et al.*, 2016) بسیاری از خواص فیزیکی طبق و دانه آفتاب‌گردان آجیلی را تعیین و دستگاه جداساز دانه بر اساس جت هوای فشرده را ساخت و ارزیابی کردند. آژارودین و همکاران (Azharuddin *et al.*, 2016) کوبنده ثابت برای جداسازی و تمیزکردن دانه آفتاب‌گردان را طراحی کرده، ساخته و ارزیابی کردند. جهانی (Jahani, 2014)، قیاسی و همکاران (Ghiasi *et al.*, 2016) مکانیزم جداکننده دانه از طبق آفتاب‌گردان را طراحی، ساخت و ارزیابی کردند. با توجه به مشکلات موجود در انجام آزمایش‌ها، بسیاری از محققان از روش سطح پاسخ برای ارزیابی و بهینه‌سازی کوبنده‌های محصولات کشاورزی استفاده کردند (Singh and Vinay, 2014; Salari *et al.*, 2013). بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که بازده و کارایی روش‌های موجود برای کوبش این محصول پایین است. همچنین دانه‌های آجیلی با توجه به نوع مصرف در بازار، باید بدون آسیب‌دیدگی از طبق در رطوبت بالا جداسازی شوند.

هدف از تحقیق حاضر طراحی و ساخت و بهینه‌سازی یک واحد کوبنده برای دانه‌های آفتاب‌گردان آجیلی است که بتوان با ترکیب سرعت ضربه‌ای مناسب و تنظیم سایر متغیرهای آن به بازده کوبش بالا و کم‌ترین درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ای دست یافت.

مواد و روش‌ها

تئوری طراحی کوبش

برای دستیابی به متغیرهای طراحی یک ماشین در زمینه جداسازی مواد دانه‌ای و غیردانه‌ای، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها مطالعه سینماتیکی و دینامیکی روی محصول کشاورزی و اجزای دستگاه مانند کوبنده، جداکننده و تمیزکننده است (Srivastava, 2006; Abdollahpour, 1998).

نیروی لازم برای کوبیدن محصولات دانه‌ای تابعی از سرعت خطی استوانه کوبنده، ضریب اصطکاک بین محصول و محصول و محصول و سطح ضدکوبنده است که در واقع مجموع نیروهای ضربه‌ای و نیروهای اصطکاکی کوبنده است (Popov *et al.*, 1986; Mohtasebi *et al.*, 2006).

$$F=\left[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}\right] \quad (۱)$$

که در آن:

F: نیروی مورد نیاز برای کوبش محصول (نیوتن)، q: نرخ تغذیه به کوبنده (کیلوگرم در ثانیه)، V: سرعت خطی استوانه کوبنده (متر بر ثانیه)، V1: سرعت ورود محصول به کوبنده (متر بر ثانیه)، f: ضریب که بستگی به اصطکاک و نوع استوانه کوبنده دارد. a: عددی تجربی است که به طول کوبنده، رطوبت محصول، نرخ تغذیه و خواص فیزیکی دانه بستگی دارد.

P_1 توان مورد نیاز (وات) برای کوبش که از ضرب طرفین رابطه (۱) در سرعت خطی V حاصل می‌شود.

$$P_1=FV=\left[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}\right]V \quad (۲)$$

از طرفی توانی هم برای غلبه بر مقاومت هوا در حین دوران استوانه کوبنده و نیروهای اصطکاکی در بلبرینگ‌ها مورد نیاز می‌باشد. که این توان (P_2) از رابطه (۳) به‌دست می‌آید (Popov *et al.*, 1986).

$$P_2=AV+BV^3 \quad (۳)$$

ضرایب A و B به‌ترتیب بستگی به اصطکاک و نیروی هوا دارد و توسط محققان پیشین برای محصولات مختلف تعیین شده است.

در نهایت توان کل لازم P_{th}، از رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$P_{th}=P_1+P_2=\left[\frac{q\,(aV-V1)}{(1-f)}\right]V+AV+BV^3 \quad (۴)$$

برای یک کوبنده با فرض این‌که با سرعت دورانی n (دور در دقیقه) هر ضربه‌زن جرم برابری از محصول (Q) بر حسب کیلوگرم دریافت می‌کند، تعداد ضربه‌زن‌ها (N_b) مطابق رابطه (۵) حاصل می‌شود (Abdollahpour, 1998)

$$Q=\frac{60q}{nN_b} \quad (۵)$$

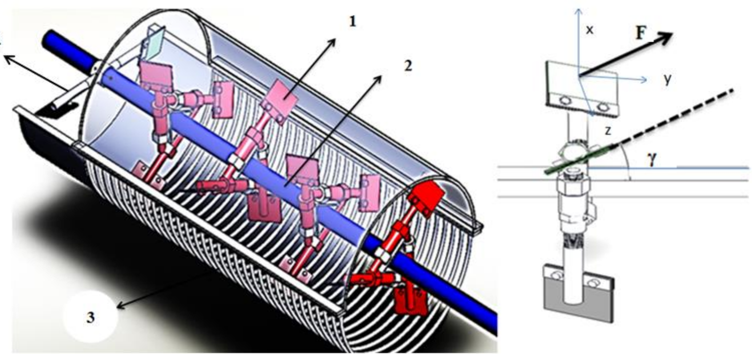
با تعیین انرژی لازم برای گسیختگی دانه در آزمایش شبه‌استاتیک E (ژول) و جرم دانه m (کیلوگرم) می‌توان سرعت بحرانی ضربه v (متر برثانیه) وارد به دانه را با استفاده از رابطه انرژی جنبشی ($E=\frac{1}{2}mv^2$) تخمین زد (Khazaei *et al.*, 2007).

شرح و ساخت واحد کوبنده

در این پژوهش یک واحد کوبنده برای دستگاه جداساز دانه آفتاب‌گردان آجیلی با بهره‌گیری از مطالعات پیشین و خواص مکانیکی و فیزیکی محصول در کارگاه ماشین‌های کشاورزی گروه مهندسی

بیوسیستم دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. برای این دستگاه اکثر متغیرهای اجزا (مانند سرعت دورانی، فاصله کوبنده و ضدکوبنده، زاویه مسیر مارپیچ ضربه‌زن‌ها و غیره) قابل تغییر و تنظیم است و می‌توان برای هر نوع شرایطی از محصول آزمایش و به‌کار برد. تنظیم بودن متغیرهای واحد کوبش در تعیین عملکردی برداشت‌کننده‌ها و دست‌یابی به کم‌ترین مقدار درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند.

شکل ۱ نمایی از واحد کوبنده با اجزا را نشان می‌دهد. کوبنده این دستگاه طرح محوری دارد (محصول در راستای محور کوبنده جابه‌جا خواهد شد). محصول از قسمت انتقال وارد تغذیه‌کننده (۴) می‌شود که از دو بازو تشکیل شده است و توسط این قسمت محصول با شتاب وارد فضای بین کوبنده و ضدکوبنده (۳) می‌شود و پس از کوبیده شدن محصول، طبق‌های خالی از دانه از انتهای کوبنده خارج شده و مواد دانه‌ای به همراه یک سری مواد غیردانه‌ای از ضدکوبنده عبور کرده و وارد قسمت تمیزکننده می‌شوند. ترکیب ضربه و مالش طبق‌های آفتاب‌گردان مهم‌ترین دلیل جداسازی دانه‌ها است. جنس صفحات ضربه‌زن (۱) لاستیکی و انعطاف‌پذیر بوده و این عامل مهم در جلوگیری از آسیب‌دیدگی دانه‌ها و هم‌چنین ایجاد مالش جهت جداسازی بهتر دانه‌ها است. الگوی نصب ضربه‌زن‌ها و تغییر موقعیت زاویه‌ای صفحات لاستیکی (γ)، باعث می‌شود که محصول در اثر نیروهای ضربه‌ای در محیط و طول کوبنده حرکت کند و عمل جداسازی در حین تنظیم نرخ تغذیه انجام شود. بیش‌ترین توان مورد نیاز برای کوبیدن با استفاده از رابطه (۴) و قرار دادن V=۲۲، α=۱، تقریباً صفر=V1، q=۱/۴، f=۰/۷، A=۰/۹، B=۰/۰۴۵ و در نظرگرفتن ضریب طراحی برابر ۱/۵، در حدود ۴/۱۴ کیلووات محاسبه شد که با استفاده از PTO تراکتور تامین می‌شود. طبق مطالعات گذشته و مشاهدات عینی طول کوبنده ۱/۲ متر، ۱۲ عدد ضربه‌زن با ۳ مسیر مارپیچی و فاصله ۰/۴ متر بین مجموعه ضربه‌زن‌ها انتخاب شد (Abdollahpour, 1998). قطر استوانه کوبنده، D (متر) و بیش‌ترین اعمال سرعت دورانی آن، n (دور در دقیقه) با استفاده از رابطه سرعت محیطی ($V=\frac{D}{2}n$) و مطالعات محققان قبلی با در نظر داشتن سرعت ضربه‌ای بحرانی دانه حاصل شد (Khazaei, 2007). جایی که با در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی دستگاه و با فرض حداکثری قطر ۶۰۰ میلی‌متر و سرعت دورانی ۶۵۰ دور در دقیقه، سرعت محیطی حدود ۲۰/۴۱ متر برثانیه به‌دست می‌آید و این عدد کوچکتر از ۲۱/۸۹ سرعت بحرانی شکست دانه آفتاب‌گردان است، که در تحقیق جعفری (Jafari, 2008) گزارش شده است. ضدکوبنده (جداساز) از مفتول‌های گرد فولادی به‌صورت شبکه جداساز که فاصله بین آن‌ها با استفاده از ابعاد دانه (Chavoshgoli *et al*., 2015) در حدود ۰/۰۲ متر ساخته شد.



شکل ۱– شماتیک واحد کوبنده با نمای عمودی مجموعه ضربه‌زن: ۱– صفحه لاستیکی ضربه‌زن با موقعیت زاویه‌ای (γ) و نیروی ضربه‌ای F، ۲– شفت کوبنده، ۳– ضدکوبنده (جداساز) و ۴– تغذیه‌کننده

Fig. 1. Schematic representation of threshing unit with cross section of a set beater: 1- Flexible plates of beaters with adjustable angular position (γ), 2- Shaft thresher, 3- Separator (concave), F- Impact force

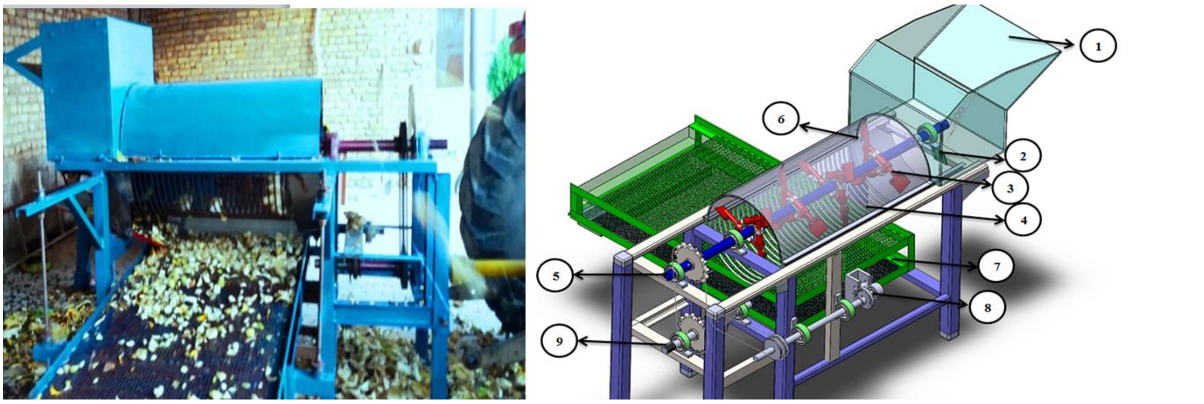
شکل ۲ دستگاه نوین ساخته‌شده را به‌همراه واحد کوبنده و سایر اجزا نشان می‌دهد.

طرح آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های عملکردی، طبق‌های دانه آفتاب‌گردان آجیلی با نام محلی قلمی از مزارع استان آذربایجان غربی تهیه شدند (شکل ۳).

پارامترهای عملکردی برای ارزیابی کوبنده شامل: بازده کوبش (٪) ، بازده جداسازی (٪) و آسیب‌دیدگی دانه‌ها (٪) طبق مطالعه سادجان و همکاران (۲۰۰۵) محاسبه شدند. با توجه به این‌که روش ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند با انجام یک‌سری آزمایش‌ها،

وقت‌گیر و اغلب بسیار پرهزینه است در این تحقیق طرح آزمایش‌ها و ارزیابی پارامترها با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) در نرم‌افزار Design Expert 11 با طرح مرکب مرکزی (CCD) انجام شد.



شکل ۲- شماتیک دستگاه ساخته شده جداساز دانه آفتاب‌گردان آجیلی، واحد کوبنده: ۱- کانال ورودی، ۲- تغذیه‌کننده، ۳- ضربه‌زن، ۴- شبکه جداساز، ۵- شفت کوبنده، ۶- پوشش استوانه کوبنده، ۷- مجموعه الک‌ها، ۸- محور نوسان‌کننده و ۹- انتقال‌دهنده توان

Fig. 2. Schematic of the apparatus for separating sunflower grain: (1) Input channel, (2) Feeder, (3) Beaters, (4) Separator (concave), (5) Thresher shaft, (6) Covering of drum thresher, (7) set of screens, (8) Crank of oscillation (9) Power transmission



شکل ۳- نمونه طبق آفتاب‌گردان آجیلی

Fig.3. The sample of heads of nutty sunflower

استفاده از این روش برای انجام آزمایش‌ها طولانی و سخت، مناسب و موثر است (Hosseinzadeh Samani *et al*., 2016; Sagar, 2018). پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شود. معمولاً مدل مورد استفاده در روش پاسخ سطح، معادله درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است و به‌صورت رابطه (۶) ارائه می‌شود (Mehrijani *et al*., 2019).

$$y= \beta_0+\sum_{i=1}^{3}\beta_i X_i+\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=i+1}^{3}\beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{3}\beta_{ij} X_i^2 \qquad (۶)$$

که در آن y پاسخ پیش‌بینی‌شده، X_i و X_j متغیرهای مستقل، β_0، β_i، β_{ii}، β_{ij} ضرایب ثابت رگرسیون هستند.

آزمایش‌های کوبنده ساخته شده برای بررسی اثر متغیرهای سرعت دورانی کوبنده با در نظر داشتن سرعت بحرانی شکست دانه و ضربه لازم برای جداسازی دانه از طبق آفتاب‌گردان بر اساس مشاهدات عینی همچنین مطالعات محققان پیشین در سه سطح ۳۸۰، ۲۸۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه، نرخ تغذیه محصول با توجه به سرعت دورانی، ابعاد و ظرفیت کوبنده در ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و محتوی رطوبت (بر پایه تر) محصول در ۶۰٪ (رطوبت برداشت آفتاب‌گردان آجیلی)، ۴۵٪ و ۳۰٪ انجام شد. طرح آزمایش‌ها و اندازه آن‌ها در جدول ۱ به‌همراه کدهای آزمایش اعمال شده در نرم‌افزار (1، 0، 1-) آورده شده است.

شرایط عملیاتی بهینه‌سازی با استفاده از گزینه بهینه‌سازی عددی (Numerical optimization) نرم‌افزار با تعیین اهداف بهینه‌سازی، یعنی Maximize کردن برای بازده‌های کوبش و جداسازی (دست‌یابی به بازده بیشتر)، Minimize کردن برای آسیب‌دیدگی دانه‌ها (دست‌یابی به آسیب دانه کمتر) تشریح شد. در این‌جا برای همه متغیرها درجه وزنی (Weight) برابر یک و درجه اهمیت (Importance) برابر ۳ قرار داده شد.

نتایج و بحث

معنی‌داری اثر متغیرها طبق آزمون آماری F-value و P-value در جدول تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد به‌طوری که مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای P-value معنی‌دار بودن نتایج تا سطح اطمینان ۹۵٪ را نشان می‌دهد. نتایج ANOVA در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر مدل‌های ایجاد شده برای همه پارامترهای عملکردی، اثر سرعت دورانی، محتوی رطوبت، توان دوم محتوی رطوبت روی بازده کوبش (٪)، اثر نرخ تغذیه، محتوی رطوبت روی بازده جداسازی (٪) و اثر سرعت دورانی، محتوی رطوبت روی آسیب‌دیدگی دانه (٪)، در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار شده است و اثر بقیه عامل‌ها معنی‌دار نبوده است. هرچه مقدار P-value کم‌تر و مقدار F-value بیش‌تر باشد نشان‌دهنده تاثیر بیش‌تر آن متغیر روی نتایج است (Safary and Chayjan, 2016). بررسی بالا بودن مقدار F-value در جدول ۲ نشان می‌دهد که تغییرات رطوبت بر بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و نیز تغییرات نرخ تغذیه بر بازده جداسازی بیش‌ترین تاثیر را در مقایسه با سایر متغیرها دارند. یعنی به‌طور مثال برای کاهش آسیب‌دیدگی دانه‌ها در حین کوبش، در اولویت اول کنترل تغییر محتوی رطوبت محصول مدنظر قرار می‌گیرد.

جدول ۱- طرح آزمایش‌های انجام شده به‌روش پاسخ سطح برای واحد کوبنده

Table 1- Experimental design proposed by RSM for threshing unit

آزمایش Run	سرعت دورانی Drum speed (rpm)	نرخ تغذیه Feed rate (kgh^{-1})	محتوی رطوبت Moisture (%w.b)	بازده کوبنده Threshing efficiency%	بازده جداسازی Separation efficiency%	آسیب‌دیدگی Grain damage%
1	280(0)	3000(0)	45(0)	99.77	61.89	0.89
2	280(0)	3000(0)	60(1)	96.12	65.96	1.1
3	280(0)	3000(0)	45(0)	99.44	61.88	0.68
4	380(1)	4000(1)	30(-1)	99.81	61.91	0.68
5	280(0)	3000(0)	30(-1)	99.57	63.33	0.58
6	180(-1)	2000(-1)	30(-1)	99.38	69.26	0.49
7	180(-1)	2000(-1)	60(1)	97.41	66.21	0.98
8	380(1)	3000(0)	45(0)	99.57	59.99	1.02
9	280(0)	3000(0)	45(0)	99.63	62.12	0.85
10	280(0)	3000(0)	30(-1)	99.41	63.21	0.54
11	380(1)	4000(1)	60(1)	97.75	56.85	1.21
12	280(0)	4000(1)	45(0)	98.76	60.1	0.91
13	280(0)	4000(1)	45(0)	98.81	60.04	0.86
14	280(0)	3000(0)	45(0)	99.55	62	0.83
15	280(0)	2000(-1)	45(0)	98.95	68.55	0.55
16	380(1)	2000(-1)	30(-1)	99.89	69.82	0.63
17	180(-1)	2000(-1)	30(-1)	99.48	69.26	0.51
18	380(1)	4000(1)	30(-1)	99.79	61.89	0.65
19	180(-1)	4000(1)	60(1)	97.43	57.45	1.04
20	380(1)	2000(-1)	30(-1)	99.91	69.74	0.61
21	180(-1)	4000(1)	30(-1)	98.12	62.12	0.52
22	380(1)	3000(0)	45(0)	99.57	59.99	1.02
23	280(0)	3000(0)	45(0)	99.65	62	0.86
24	280(0)	3000(0)	60(1)	96.12	65.96	1.1
25	380(1)	2000(-1)	60(1)	97.83	65.67	1.25
26	280(0)	3000(0)	45(0)	99.06	68.45	0.59
27	380(1)	4000(1)	60(1)	97.76	56.71	1.11
28	180(-1)	2000(-1)	60(1)	97.43	66.18	0.97
29	380(1)	2000(-1)	60(1)	97.83	65.67	1.25
30	180(-1)	3000(0)	45(0)	98.47	64.98	0.66
31	180(-1)	3000(0)	45(0)	98.43	64.94	0.65
32	180(-1)	4000(1)	60(1)	97.29	57.34	1.01
33	180(-1)	4000(1)	30(-1)	98.82	62.32	0.54
34	280(0)	2000(-1)	45(0)	99.06	68.45	0.59

با انجام آنالیز رگرسیون چند متغیره، مدل چندجمله‌ای برای پیش‌بینی بازده کوبش (y_1)، بازده جداسازی (y_2) و آسیب‌دیدگی دانه (y_3) بر حسب سرعت دورانی (A)، نرخ تغذیه (B) و محتوی رطوبت (C) به‌ترتیب در روابط (۸)، (۹) و (۱۰) آمده است.

$$y_1=96.12-0.0075A-0.0014B+0.327C+1.056(10^{-6})A\times B-0.083(10^{-3})A\times C+7.708(10^{-6})B\times C+0.021(10^{-3})A^2+9.57(10^{-8})B^2-0.0044C^2 \quad (۸)$$

$$y_2=80.31+0.071A-0.006B - 0.365C -1.16(10^{-6})A\times B - 0.11(10^{-3})A\times C - 0.023(10^{-3})B\times C - 0.012(10^{-3})A^2 + 5.93(10^{-7})B^2 + 0.0041C^2 \quad (۹)$$

$$y_3=-0.034-0.0024A+0.0004B-0.0038C-1.56(10^{-7})A\times B+0.13(10^{+4})A\times C-9.58(10^{-7})B\times C+5.9(10^{-6}) A^2 - 5.09(10^{-8}) B^2 + 0.00022C^2 \quad (۱۰)$$

جدول ۲– آنالیز واریانس نتایج عملکردی واحد کوبنده با استفاده از Design Expert

Table 2- Analysis of variance for performance of threshing unit using Design Expert

منابع تغییر **Source of variation**	**df**	بازده کوبش٪ **Threshing efficiency% (y_1)**		بازده جداسازی٪ **Separation efficiency% (y_2)**		آسیب‌دیدگی دانه٪ **Grain damage% (y_3)**	
		F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
مدل Model	9	16.82	< 0.0001	11.35	< 0.0001	23.17	< 0.0001
سرعت دورانی Drum speed (A)	1	12.93	0.0015	1.79	0.1937	26.2	< 0.0001
نرخ تغذیه Feed rate (B)	1	1.87	0.1846	86.23	< 0.0001	3.03	0.0948
محتوی رطوبت Moisture content (C)	1	104.81	< 0.0001	10.66	0.0033	171.49	< 0.0001
A×B	1	0.8318	0.3708	0.0553	0.816	0.4824	0.494
A×C	1	1.15	0.2935	0.1149	0.7376	0.7418	0.3976
B×C	1	0.9967	0.3281	0.491	0.4902	0.4083	0.5289
A^2	1	1.11	0.303	2.03	0.1669	2.3	0.142
B^2	1	0.2285	0.6369	0.4819	0.4942	1.72	0.2021
C^2	1	24.69	< 0.0001	1.17	0.2906	1.76	0.1976
باقیمانده Residual	7						
عامل عدم برازش Lack of fit	5	29.28	< 0.0001	6.38	0.0012	5.27	0.0033
مجموع همبستگی Correlation total	16						

اطلاعات آماری مربوط به مدل‌های ایجاد شده نتایج در جدول ۳ آورده شده است. هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر باشد قدرت مدل برازش‌یافته در توصیف تغییرات پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرها می‌باشد. مقادیر بالای R^2 و Adj-R^2 یک ارتباط و همبستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایشی برای بازده کوبش و توانایی مدل برای برازش اطلاعات را نشان می‌دهد. پارامتر Adj.R^2 میزان تغییرات داده‌ها در اطراف میانگین می‌باشد که توسط مدل شرح داده شده است. Adeq.Precision، مقادیر به‌دست آمده در نقاط مرکزی را نسبت به میانگین بررسی می‌کند و چنانچه مقدار آن بیش‌تر از ۴ باشد نشان‌دهنده این است که مدل ارائه شده از کفایت لازم برخوردار است. C.V میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند و از تقسیم Std.Dev. (انحراف معیار) بر Mean (میانگین) ضرب در ۱۰۰ به‌دست می‌آید (Ahamadi Gavidelan, 2013; Safary *et al*., 2016). به‌عنوان یک قاعده کلی C.V. نباید از ٪۱۰ بیش‌تر شود، که در این‌جا مقدار پایینی دارند و نشان‌دهنده دقت و قابلیت اطمینان آزمایش‌های انجام شده می‌باشد.

جدول ۳– اطلاعات آماری مربوط به مدل‌های بازده کوبش٪، بازده جداسازی٪ و آسیب‌دیدگی دانه٪ در کوبنده

Table 3- Statistical information on models of threshing efficiency% (y_1), separation efficiency% (y_2), grain damage% (y_3)

نتایج **Results**	انحراف معیار **Std. Dev.**	میانگین **Mean**	ضریب تغییر **C.V. %**	ضریب تبیین **R^2**	**R^2 تنظیم شده Adj. R^2**	دقت **Adeq. Precision**
بازده کوبش٪ Threshing efficiency% (y_1)	0.4633	98.70	0.4694	0.87	0.82	12.54
بازده جداسازی٪ Separation efficiency% (y_2)	1.98	63.60	3.11	0.83	0.75	11.45
آسیب‌دیدگی دانه٪ Grain damage% (y_3)	0.0814	0.8156	9.9814	0.90	0.86	1.475

منحنی‌های سه‌بعدی برای بررسی پارامترهای عملکردی در مقابل تغییرات سرعت دورانی × نرخ تغذیه (در رطوبت ۴۵٪)، سرعت دورانی × رطوبت (در نرخ تغذیه ۳۰۰۰ کیلوگرم در ساعت) و نرخ تغذیه × محتوی رطوبت (در سرعت دورانی ۲۸۰ دور در دقیقه) در شکل ۴ مشاهده می‌شود. شکل ۴ (c ،b ،a) نشان داد که با کاهش محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ و نرخ تغذیه از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ تا ۲۸۰، بازده کوبش افزایش و تمایل دانه‌ها به جداشدن از طبق‌ها بیش‌تر می‌شود. کاهش رطوبت باعث کاهش نیروی چسبندگی دانه‌ها روی طبق شده و جدایش دانه‌ها به‌راحتی صورت می‌گیرد همچنین با افزایش سرعت دورانی، تعداد و مقدار ضربه وارد به طبق‌ها بیش‌تر شده و در نتیجه دانه‌های کم‌تری روی طبق‌های کوبیده که از خروجی کوبنده خارج می‌شوند، باقی می‌ماند. از طرفی نرخ تغذیه پایین سبب می‌شود که شتاب ورود مواد از تغذیه‌کننده به داخل کوبنده و در نتیجه ضربه وارده به طبق‌ها بیش‌تر باشد و جدایش بیش‌تری از دانه انجام گیرد. سادجان و همکاران (Sudajan *et al*., 2002) و قیاسی و همکاران (Ghiasi *et al*., 2016) در محدوده مطالعاتی که برای کوبنده آفتاب‌گردان انجام دادند به چنین نتایج مشابهی دست یافتند. بیش‌ترین مقدار درصد طبق‌های کوبیده شده (۹۹/۸۱٪) در رطوبت ۳۰٪ و کم‌ترین مقدار (۹۶/۱۲٪) در رطوبت برداشت محصول (۶۰٪) حاصل شد. در شکل ۴ (f ،e ،d) مشخص است که بازده جداسازی ضدکوبنده با کاهش محتوی رطوبت و نرخ تغذیه افزایش یافته است هرچند تغییر سرعت دورانی از لحاظ آماری اثر تاثیرگذاری نداشت. چون در رطوبت پایین (تا ۳۰٪) طبق‌ها از حالت ترد و شکنندگی خارج شده و انعطاف‌پذیرتر هستند که باعث می‌شود در مقابل ضربه کم‌تر خرد شوند، همچنین در نرخ تغذیه پایین تعداد برخوردهای طبق‌ها کم‌تر است و باعث کاهش تکه‌های خردشده محصول (مواد غیردانه‌ای) شده که از شبکه ضدکوبنده عبور می‌کنند، بنابراین با این تغییرات بازده جداسازی هم افزایش پیدا می‌کند. نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰٪ نقاطی بودند که بیش‌ترین بازده جداسازی (۶۹/۸۲٪) گزارش شد. به‌طور مشخص با کاهش سرعت دورانی کوبنده از ۳۸۰ تا ۱۸۰ دور در دقیقه و محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۱/۲۵ تا ۰/۴۹ کاهش پیدا کرده است هرچند تغییر نرخ تغذیه اثر چندانی روی آسیب‌دیدگی دانه‌ها نداشته است (شکل ۴ (i ،h ،g)). چون در سرعت دورانی پایین میزان نیروی ضربه‌ای وارد به دانه‌ها کم‌تر بوده و در رطوبت ۳۰٪ پوسته دانه از حالت شکنندگی خارج شده در مقایسه با رطوبت برداشت قابلیت جذب انرژی بیشتری در ضربات کوبنده دارد، بنابراین درصد آسیب‌دیدگی کاهش می‌یابد. گول و همکاران (Goel *et al*., 2009) در تحقیق خود برای کوبنده دستی آفتاب‌گردان نتایج مشابهی را ارائه دادند و بیان کردند که با تغییر رطوبت از ۱۳/۸۴٪ تا ۸/۳۸٪ درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۲/۰۷٪ تا ۰/۱۵٪ کاهش پیدا کرد. سادجان و همکاران (Sudajan *et al*., 2002) بیان کردند که با افزایش سرعت دورانی آسیب‌دیدگی دانه از ۱/۲۴٪ تا ۱/۸۳٪ افزایش می‌یابد. آن‌چه که نمایان است با افزایش سرعت دورانی، بازده کوبش و ظرفیت کاری افزایش می‌یابد و از طرفی درصد آسیب‌دیدگی دانه هم افزایش پیدا می‌کند (Ukatu, 2006). محققان بسیاری هم گزارش کردند که تغییرات محتوی رطوبت دانه یکی از عامل‌های مهم در آسیب‌دیدگی دانه‌ها است (Salari *et al*., 2013). لازم است که با توجه به هدف مورد نظر و شرایط کاری، نقاط بهینه را انتخاب کرد.

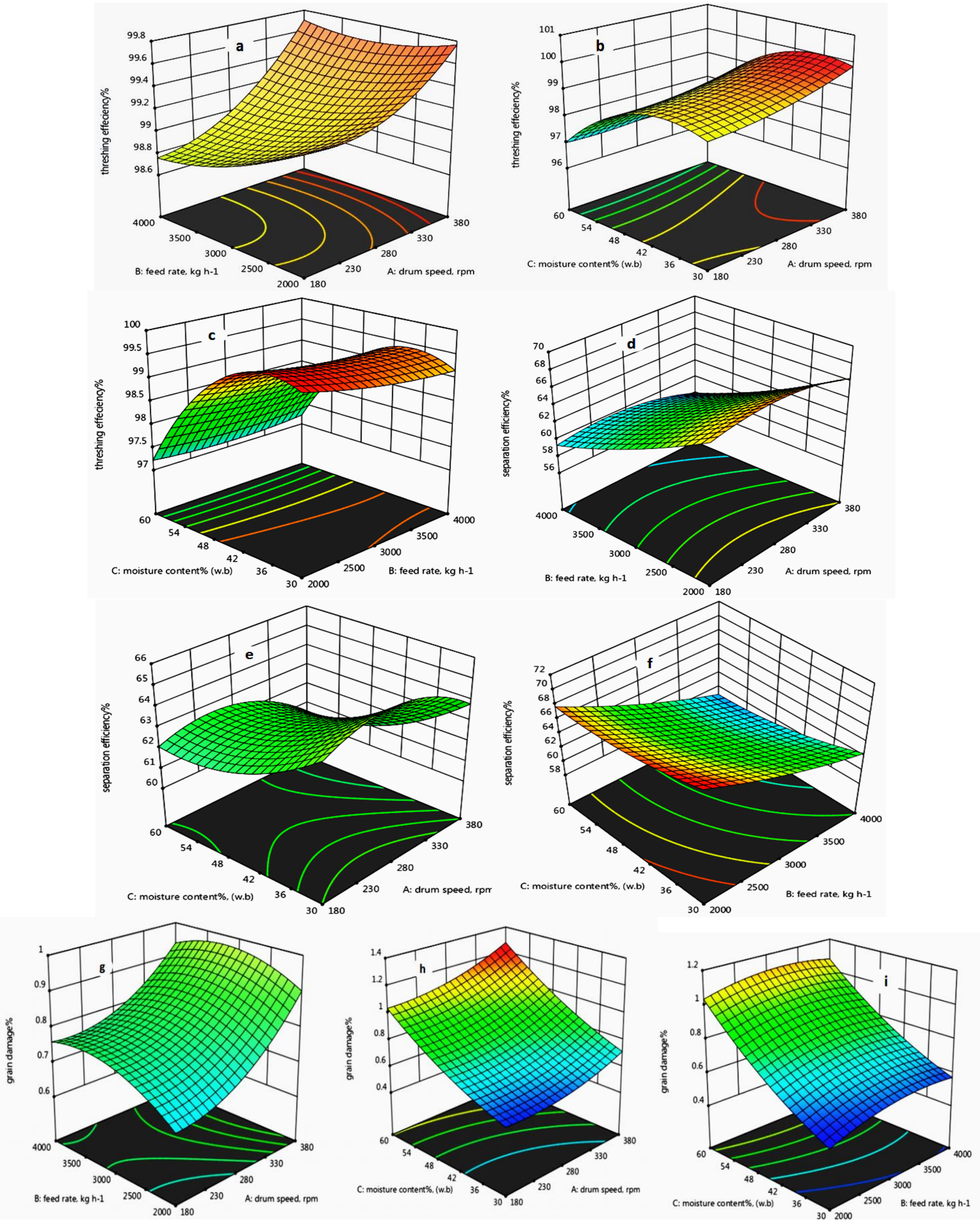
بهینه‌سازی فرآیند کوبش

بهینه‌سازی یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی و تحلیل آزمایش‌هاست. با توجه به نتایج به‌دست آمده در فرآیند بهینه‌سازی کوبیدن دانه آفتاب‌گردان آجیلی و برای رسیدن به بیش‌ترین بازده کوبش و جداسازی و کم‌ترین درصد آسیب‌دیدگی دانه، نرم‌افزار Design Expert ۶۵ نقطه را پیشنهاد داد، نقطه‌ای با بیش‌ترین شاخص مطلوبیت در شکل ۵ آورده شده است که برای عملکردهای مشخص شده نقطه با سرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰/۷۴٪ تعیین شد. جهت دست‌یابی به شرایط بهینه و تنظیمات لازم روی متغیرهای دستگاه، استفاده از این مقادیر مورد نیاز می‌باشد. سینگ و وینای (Singh and Vinay, 2014) از این روش برای بهینه‌سازی کوبنده سورگوم استفاده کردند.

نتیجه‌گیری

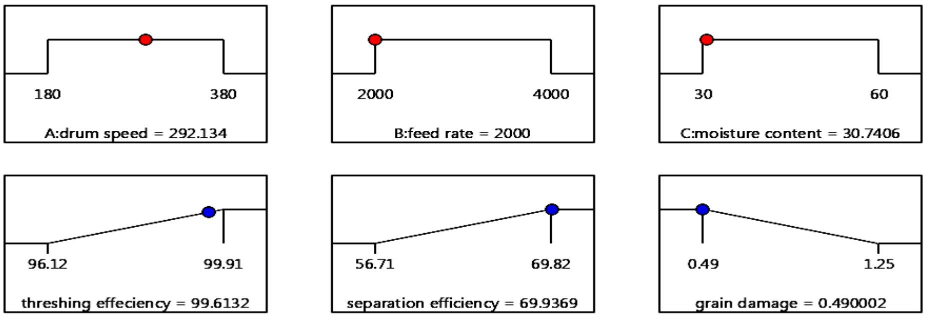
کوبنده با طرح محوری طراحی، ساخت و ارزیابی شد و برای جداسازی دانه آفتاب‌گردان آجیلی از طبق به‌کار برده شد. با توجه به کاربرد آن، این پژوهش می‌تواند گامی مهم در توسعه کمباین و ماشین‌های برداشت‌کننده این محصول باشد.

اثر مدل‌های ایجاد شده و متغیرهای مستقل روی اکثر متغیرهای وابسته (پارامترهای عملکردی) در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار شد. به‌طوری‌که تغییرات رطوبت بر بازده کوبش و آسیب‌دیدگی دانه و نیز تغییرات نرخ تغذیه بر بازده جداسازی بیش‌ترین تاثیر را در مقایسه با سایر متغیرها داشت.



شکل ٤- منحنی‌های سه‌بعدی اثر متغیرها روی پارامترهای عملکردی واحد کوبنده

Fig. 4. 3D surface response plots to observed the effect of drum speed, feed rat, moisture content on threshing efficiency (a, b, c), separation efficiency (d, e, f) and grain damage (g, h, i).



شکل ۵- متغیرهای بهینه‌شده واحد کوبنده در نرم‌افزار

Fig. 5. Optimized variables of threshing unite in software with options of Ramps

با کاهش محتوی رطوبت از ۶۰٪ تا ۳۰٪ و نرخ تغذیه از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰ و افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ تا ۲۸۰، بازده کوبش افـزایش یافت. بیش‌تـرین مقـدار بـازده کـوبش (۹۹/۸۱٪) در رطوبـت ۳۰٪ و کم‌ترین مقدار (۹۶/۱۲٪) در رطوبت برداشت محصول (۶۰٪) حاصـل شد. با کاهش محتوی رطوبت و نرخ تغذیه بازده جداسازی ضدکوبنده افزایش یافت. نـرخ تغذیـه ۲۰۰۰ و رطوبـت ۳۰٪ نقـاطی بودنـد کـه بیش‌ترین بازده جداسازی (۶۹/۸۲٪) گزارش شد. بـا کـاهش سـرعت دورانی و محتوی رطوبت درصد آسیب‌دیدگی دانه‌ها از ۱/۲۵ تـا ۰/۴۹ کاهش پیدا کرد.

نرم‌افزار Design Expert با هدف دست‌یابی به بیش‌ترین بـازده کوبش و جداسازی و کم‌ترین آسـیب دانـه، نقطـه بهینـه بـا سـرعت دورانی ۲۹۲/۱۳۴ دور در دقیقه، نرخ تغذیه ۲۰۰۰ کیلوگرم در ساعت و رطوبت ۳۰/۷۴٪ را تعیین کرد.

References

1. Abdollahpour, Sh. 1998. Studying the Type of Grains Combine and Presentation a Suitable Design for Condition of Iran. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. University of Tehran Iran. (In Persian).
2. Ahmadi Gavidelan, M. 2013. Optimization of hazelnut drying in infrared fluidized bed using response surface method. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. Bu-Ali Sina University, Iran. (In Persian).
3. Azharuddin, K., S. Mir, M. Narasimhan, and G. Pavan Kumar. 2016. Design and Fabrication of Sunflower Seed Extracting Machine. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) 4 (5): 90-97.
4. Chavoshgoli, E., Sh. Abdollahpour, R. Abdi, and A. Babaie. 2015. Engineering properties of sunflower seeds and materials other grain as moisture content for equipment of separator. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 17 (1): 10-21.
5. Hosseinzdeh Samani, B., E. Fayyazi, B. Ghobadian, and S. Rostami. 2016. Studying and optimizing the biodiesel production from mastic oil aided by ultrasonic using response surface method. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 440-450. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v6i2.37796.
6. Ghiasi, P., A. Masoumi, and A. Hemmat. 2016. Designing, construction and evaluation a thresher and concave of combine for harvesting of sunflower. 10th National Congress of Biosystems and Mechanization in Iran. (In Persian).
7. Goel, A. K., D. Behera, S. Swainand, and B. K. Behera. 2009. Performance Evaluation of a low-Cost Manual Sunflower Thresher. Indian Journal of Agricultural Research 43 (1): 37-41.
8. Jafari, S. 2008. Design and Construction a Laboratory Sunflower Seed Dehuller Machine. Faculty of Agriculture. University of Tehran, Iran. (In Persian).
9. Jahani, F. 2014. Designing, construction and evaluation a separator of sunflowwer grain. M.S. thesis. Graduate Studies Office in Mechanic of Agricultural Machinery. University of Shiraz, Iran. (In Persian).
10. Khazaei, J., A. Lotfi, M. Aminnayeri, and M. Zaki. 2007. Modelling the mechanical damage to lentil seeds under impact loading. Lucari Stiintifice 49 (1): 262-271.
11. Lotfi, A. 2009. Construction and performance evaluation of a local device for separating sunflower seeds and environment preservation. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 40 (4): 73-79.
12. Mehrijani, M., J. Khodaei, and S. Zareei. 2019. Modeling and Optimizing of the Energy Consumption of Moldboard Plow using Response Surface Methodology (RSM). Journal of Agricultural Machinery 9 (1): 167-176. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22067/jam.v9i1.65908.
13. Mirzabe, A. H., and G. R. Chegini. 2016. Effect of air-jet impingement parameters on the removing of sunflower

seeds from the heads in static conditions. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 18 (2): 43-59.

14. Mohtasebi, S., M. Behriizilar., J. Alidadian, and K. Besharati. 2006. A New Design for Grain Combine Thresher. International Journal of Agriculture and Biology 8 (5): 1560-8530.
15. Muna, N. H., U. S. Muhammed, A. M. El-Okene, and M. Isiaka. 2016. Development and Validation of Threshing Efficiency Mathematical and Optimization Model for Spike Tooth Cereal Threshers. International Journal of Engineering Research and Development 12 (11): 50-60.
16. Popov, I. F., N. I. Kienen, and V. Asakun, 1986. Agricultural machine .Russian Translations Series 31, A.A Balkema, Roterdam. P: 433-451.
17. Safary, M., and R.A. Chayjan. 2016. Optimization of Almond Kernels Drying under Infrared-vacuum Condition with Microwave Pretreatment using Response Surface Method and Genetic Algorithm. Journal of Agricultural Science and Technology 18: 1543-1556.
18. Sagar, M., U. Baligidad, K. Chandrasekhar, and S. Elangovan. 2018. RSM Optimization of Parameters influencing Mechanical properties in Selective Inhibition Sintering. Materials Today: Proceedings 5: 4903-4910.
19. Salari, K., R. Amiri Chayjan, J. Khazaei, and J. Amiri Parian. 2013. Optimization of Independent Parameters for Chickpea Threshing Using Response Surface Method (RSM). Journal of Agricultural Science and Technology 15: 467-477.
20. Salokhe, V. M., S. Sudajan, and S. Chusilp. 2005. Effect of concave hole size, concave clearance and drum speed on rasp-bar drum performance for threshing sunflower. AMA, Agriculture Mechanization in Asia, Africa and Latin America 36 (1): 52-60.
21. Singh, D., and D. Vinay. 2014. Optimization of machine parameters of Parvatiya Sugam motorized thresher using response surface methodology. Journal of Applied and Natural Science 6 (1): 207-213.
22. Srivastava, A., C. Goering, R. Rohrbach, and D. Buckmaster. 2006. Engineering principles of agricultural machines. St. Joseph, Michigan, USA. 2nd ed.
23. Sudajan, S., V. M. Salokhea, and K. Triratanasirichai. 2002. Effect of Type of Drum, Drum Speed and Feed Rate on Sunflower Threshing. Biosystems Engineering 83 (4): 413-421.
24. Thasaiya, A. S., R. M. Musuvadi, C. Tarsem, Sh. Rajiv, and S. Thirupathi. 2014. Compression loading behaviour of sunflower seeds and kernels. International Agrophysics 28: 543-548.
25. Ukatu, A. C. 2006. A Modified Threshing Unit for Soya Beans. Biosystems Engineering 95 (3): 371-377.
26. Xu, L. Z., Y. M. Li, Z. Ma, Z. Zhao, and C. H. Wang. 2013. Theoretical analysis and finite element simulation of a rice kernel obliquely impacted by a threshing tooth. Biosystems Engineering 114 (2): 146-156.
27. Zhenjie, Q., J. Chengqian, and Z. Dingguo. 2017. Multiple frictional impact dynamics of threshing process between flexible tooth and grain kernel. Computers and Electronics in Agriculture 141: 276-285.